

ЭППТ 2018



ACED 2018

УДК 621.34: 62-50

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА БЕЗ ДАТЧИКА СКОРОСТИ

RESEARCH OF TORQUE CONTROL SYSTEMS OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITHOUT SPEED SENSOR

Виноградов Анатолий Брониславович, д-р техн. наук, начальник лаборатории регулируемого электропривода ПАО «НИПТИЭМ», Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: vinogr_ab@mail.ru, Тел.: +74932269708

Глебов Николай Алексеевич, инженер-программист лаборатории регулируемого электропривода ПАО «НИПТИЭМ», Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: vector@drive.ispu.ru, Тел.: +74932269708

Anatoly B. Vinogradov, Doctor Sc., chief of the adjustable electric drive laboratory, PJSC «NIPTIEM», 600009, Elektrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: vinogr_ab@mail.ru. Ph.: +74932269708

Nikolai A. Glebov, programming engineer of the adjustable electric drive laboratory, PJSC «NIPTIEM», 600009, Elektrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: vector@drive.ispu.ru. Ph.: +74932269708

Аннотация: Сформулированы технические требования к тяговым электроприводам без датчика скорости/положения транспортных средств с электромеханической трансмиссией и приводам стартеров газотурбинных агрегатов, в том числе распространяющиеся на высоконасыщенный асинхронный электропривод с большим температурным диапазоном, областью ослабления поля и высоким относительным уровнем потерь в стали. Представлены результаты исследования различных вариантов построения системы управления электроприводом.

Abstract: Technical requirements to traction electric drives without speed/position sensor of vehicles with electromechanical transmission and to drives of starters for gas-turbine installations are formulated, including high-saturated asynchronous electric drive with the big temperature range, area of a field weakening and large relative level of losses in a steel. Results of research of various variants of electric drive control system designs are presented.

Ключевые слова: асинхронный электропривод; тяговый электропривод; бездатчиковое управление; векторное управление; частотное управление; стартер газотурбинного агрегата.

Key words: asynchronous electric drive; traction electric drive; sensorless control; vector control; frequency control; starter of the gas-turbine installation

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в тяговых электроприводах традиционно применяются частотные либо векторные системы управления с датчиком скорости/положения на валу двигателя. При этом, преимущество отдается векторным приводам, как обладающим более высокими динамическими показателями. На данный момент датчик скорости является одним из самых ненадежных элементов в тяговых электроприводах большой мощности, работающих в весьма тяжелых условиях по вибрации и температуре окружающей среды. Как показывает практика эксплуатации тяговых приводов большой и средней мощности, к кратковременным сбоям в работе канала измерения скорости могут приводить не только повышенные механические нагрузки, но и постепенный износ под-

шипниковых узлов, электродинамические усилия, возникающие в конструкции машин при больших переменных токах, наводки на первичную систему измерения датчика, конструктивно расположенную в электрической машине. В приводах малой мощности применение датчика на валу двигателя заметно сказывается не только на надежности, но и на стоимости привода.

Известно, что бездатчиковый асинхронный электропривод с векторным управлением уже достаточно давно входит в стандартный набор исполнений преобразователей частоты универсального назначения ведущих зарубежных фирм, а также в отечественный привод универсального назначения серии ЭПВ, разработанный НТЦ Электропривода «Вектор» Ивановского государственного энергетического университета и выпускавшийся в ООО

«ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода с начала двухтысячных годов [1,2]. Он обеспечивает диапазон регулирования скорости 100 и полосу пропускания контура скорости в десятки Гц. Применение подобных приводов в тяговых приложениях до сих пор сдерживалось их особенностями [3,4], а именно:

- эксплуатацией в условиях повышенных климатических и механических воздействий;
- необходимостью достаточно быстрой (десятые доли секунды) и точной (не хуже 5..10%) отработки задания по моменту в условиях больших изменений параметров двигателя в процессе работы (активные сопротивления могут изменяться в 2 раза из-за температуры, индуктивности – в 3 из-за насыщения различных участков магнитопровода);
- работа с широкой второй и третьей зонами регулирования скорости, суммарный диапазон которых в отдельных применениях может быть более 10;
- сильным влиянием на процессы в электроприводе глубокого насыщения магнитопровода асинхронного двигателя (АД) на малых скоростях и процессов в стали на средних и больших скоростях.

Необходимым атрибутом любой системы управления моментом электропривода переменного тока без датчика скорости/положения является наблюдатель состояния (вычислитель скорости и других переменных и параметров) электропривода, к которому, как правило, предъявляются определенные требования к динамической и статической точности, а также адаптируемости к изменениям параметров и структурным неточностям математических моделей. Вопросы построения таких устройств достаточно хорошо отражены в современной технической литературе, в частности в [6..11, 1, 5].

В настоящей статье рассматриваются основные результаты исследований, полученные в процессе разработки асинхронного электропривода без датчика на валу двигателя, предназначенного для применения в качестве тягового электропривода различных транспортных средств (карьерных самосвалов, тракторов, автобусов, троллейбусов, трамваев, электропоездов, тепловозов и др.), питаемых как от дизель-генераторных установок, так и от сети. Другими возможными сферами применения данного электропривода являются любые механизмы, требующие регулирования момента либо формирования его предельного значения в рабочем диапазоне скоростей (например, стартеры газотурбинных агрегатов), не предъявляющие повышенных требований к диапазону регулирования скорости (с требуемым диапазоном регулирования скорости не более 100).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрабатываемая система управления асинхронным тяговым электроприводом должна удовлетворять следующему набору свойств и технических характеристик:

- отсутствие датчиков на валу двигателя и других датчиков и измерительных обмоток, предполагающих существенное усложнение его конструкции;
- общий диапазон регулирования скорости: не менее 100;
- диапазон регулирования скорости выше номинальной: не менее 10;
- реакция на ступенчатое изменение момента/мощности от максимального двигательного до максимального генераторного значения: в зависимости от мощности привода (0.1..1)МВт не должна превышать значений 0.2...1 с;
- погрешность отработки заданного момента в рабочем диапазоне частот при условии 2-кратного изменения активных сопротивлений и 3-кратного изменения взаимной индуктивности АД: не более 10% от его номинального значения;
- нечувствительность привода к 30%-му отклонению в индуктивностях рассеяния;
- сохранение приводом заявленной динамической и статической точности регулирования момента при уровне потерь в стали АД не менее 50% от общего уровня потерь;

Для электропривода стартера газотурбинного агрегата (ГТА), обладающего относительно большим моментом инерции, технические требования несколько смягчаются, а именно:

- диапазон регулирования скорости выше номинальной снижается до 3;
- снижается требование к скорости изменения электромагнитного момента: может составлять единицы секунд;
- мощность генераторного режима ограничивается величиной 0.1 от номинальной;
- существенно снижаются требования к точности регулирования момента: достаточно его формирования на предельном для действующих в системе ограничений по току и напряжению уровне. При этом допускаются колебания момента/тока в размере до 10% от их номинальных значений, вызываемые периодическими попаданиями привода в область токоограничения.

На первом этапе исследований стояла задача выбора рациональной структуры системы управления приводом, наилучшим образом удовлетворяющей указанным выше требованиям. На компьютерной модели были исследованы следующие возможные варианты построения системы управления без датчика на валу двигателя:

- система 1 частотного управления АД с векторной ориентацией в установившихся режимах работы, являющаяся аналогом системы управления,

использованной в исполнении 1 привода серии ЭПВ [1];

- *система 2* выполненная по структуре векторного управления тяговым приводом на основе идентификатора параметров [4], учитывающая потери в стали и оптимизированная по потерям, в которой в качестве информации об угловой скорости используется ее оценка, полученная в наблюдателе состояния, выполненном по структуре, представленной в [1 и 2] для электропривода ЭПВ исполнения 4 (векторный бездатчиковый асинхронный ЭП);

- *система 3* частотного управления, построенная на основе известного соотношения между электромагнитным моментом и скольжением АД [1] и наблюдателя состояния для электропривода ЭПВ исполнения 4;

- *система 4* частотного управления, построенная на основе соотношения между электромагнитным моментом и скольжением АД с упрощенным наблюдателем состояния, использованным в ЭПВ исполнения 1, не учитывающим индуктивности рассеяния статора и ротора, потери в стали, насыщение магнитной системы;

- *система 5*, представляющая собой комбинацию систем управления 2 и 3, при которой начальный этап разгона привода осуществляется в рамках системы векторного управления 2, а вся остальная работа выполняется в рамках системы частотного управления 3;

В процессе исследований поведения вышеуказанных систем управления применительно к приводам различных объектов, среди которых: тяговые электроприводы карьерных самосвалов 90 и 240 тонн, колесного трактора мощностью 300 л.с., гибридного 12-метрового автобуса, приводы стартеров газотурбинных агрегатов с номинальной частотой 50 и 400Гц и АД, производства ПАО «НИПТИЭМ» и ОАО «ЭЛДИН», получены следующие результаты:

Система 1 показала наихудшие показатели регулирования момента. Она не применима к тяговым приводам, т.к. не обладает функцией регулирования момента вне области токоограничения и подходит для частотного разгона приводов с большими моментами инерции по предельной механической характеристике, получаемой в области токоограничения. Ее основным преимуществом является простота наблюдателя состояния и регулятора и, как следствие, возможность быстрой реализации системы управления на недорогом микроконтроллере с весьма ограниченной производительностью.

Система 2 в основном удовлетворяет указанным выше требованиям. При точной настройке параметров системы управления на фактические параметры АД она обеспечивает высокую точность ре-

гулирования момента, желаемую инвариантность к изменениям активных сопротивлений и взаимной индуктивности, практическое отсутствие колебаний переменных в переходных режимах и при работе в области токоограничения. К ее недостаткам следует отнести высокую чувствительность характеристик к отклонениям системных индуктивностей рассеяния от их фактических значений, что особенно проявляется на больших частотах. В частности, при определенных соотношениях параметров АД и режимов его работы привод может потерять работоспособность в области частот, близких к максимальной, уже при отклонении в индуктивностях рассеяния более 5%. Повышенная чувствительность привода к параметрам требует, как правило, проведения специальных стендовых настроек на конкретный двигатель и может создавать определенные проблемы при замене двигателя непосредственно на объекте, в частности, в виде некоторого ограничения области допустимых режимов работы привода. Небольшое недоиспользование привода с данной системой управления по напряжению (в размере 5..10%) при работе в области ограничения напряжения, необходимое для обеспечения ее управляемости в переходных режимах, приводит к некоторому снижению максимального момента относительно его значения, получаемого при полном использовании напряжения. Хорошо известна квадратичная зависимость максимального момента от напряжения. Для сохранения полной управляемости токов векторной системы при работе на больших скоростях в области глубокого ослабления поля, ограничения напряжения и наличии ступенчатого изменения заданного момента приходится ограничивать производную изменения момента (мощности), что несколько снижает быстродействие данной системы на больших скоростях, хотя и удовлетворяет требованиям к быстродействию привода.

Система 3 в основном удовлетворяет требованиям к электроприводу. Ее преимуществами относительно предыдущей являются:

- низкая чувствительность к соответствию параметров, задаваемых, либо вычисляемых в системе управления параметрам АД (допустимы 100%-е отклонения в активных сопротивлениях и 50%-е отклонения в индуктивностях взаимной и рассеяния), т.е. специальная стендовая настройка привода на параметры двигателя, как правило, не требуется;

- более высокое предельное значение момента и перегрузочная способность привода при работе в области ограничения по напряжению и току, обусловленное отсутствием вынужденного недоиспользования привода по напряжению;

- более высокое быстродействие привода в режиме отработки ступенчатого изменения задания по моменту при работе в области ограничения по напряжению и глубокого ослабления поля.

Статические точности обработки заданного момента систем 2 и 3 сопоставимы и определяются точностью работы наблюдателей переменных и параметров, которые в данных системах управления построены аналогично. Недостатком системы 3 является более затянутые процессы и наличие колебательности в стартовой (околонулевой) области работы электропривода. Как правило, этот эффект усугубляется с ростом номинальной мощности и частоты. Если в тяговых приводах средней мощности (трактор 300 л.с. и гибридный автобус), а также в приводах стартеров ГТА максимальной мощностью 160 кВт, с проявлениями данного эффекта в стартовой области можно смириться, то в более мощных приводах карьерных самосвалов приходится переходить к векторной структуре управления, по крайней мере в стартовой области привода.

Система 4 из-за упрощенной структуры примененного в ней наблюдателя состояния АД неспособна обеспечить желаемой точности задания момента при работе в условиях больших изменений взаимной индуктивности, потерь в стали, падений напряжения на индуктивностях рассеяния и поэтому неприменима в тяговых электроприводах. Однако, она вполне может подойти для управления приводом стартера или другого механизма с большим моментом инерции, основной задачей которого является выход на желаемую скорость с моментом близким к предельному при действующих ограничениях по току и напряжению. Основным ее достоинством, как и системы 1, является простота и возможность реализации на недорогом микроконтроллере относительно невысокой производительности. Следует отметить, что она также, как и любая частотная система управления довольно нечувствительна к параметрам двигателя и не требует специальных стендовых настроек. Особенностью данной системы является наличие небольших автоколебаний (не более 10% от номинала в токе и моменте) вследствие ее периодического попадания в область токоограничения.

Система 5 показала наилучшие результаты по критерию наилучшего удовлетворения требованиям к тяговым приводам без датчика скорости. Использование на начальном этапе разгона привода векторного алгоритма управления позволяет устранить нежелательное затягивание и повышенную колебательность переходных процессов. Переход к частотной системе на более высоких скоростях обеспечивает низкую чувствительность к отклонениям параметров, сигнальным погрешностям и помехам, увеличение предельного момента при заданных ограничениях тока и напряжения, снижение времени обработки ступенчатого изменения заданного момента при работе в области глубокого ослабления поля и ограничения напряжения. Плавный процесс переключения структур

управления реализован за счет координации начальных условий работы частотного регулятора с текущим состоянием векторного регулятора в точке перехода, выбором рациональных значений переменных привода в точке перехода, полученных на основе серии модельных экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Моделирование выполнялось в программном пакете Delphi с учетом процессов в стали и эффекта насыщения магнитопровода АД [1]. На компьютерной модели были апробированы все 5 указанных выше систем управления применительно к следующим объектам:

- тяговым приводам карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 240 и 90 тонн с комплектами тягового электрооборудования (КТЭО), произведенными на предприятиях концерна «Русэлпром» (ПАО «НИПТИЭМ», в части системы управления и ООО «Русэлпром-СЭЗ» в части электрических машин;
- тяговому приводу колесного трактора 300 л.с. производства Минского тракторного завода с электромеханической трансмиссией производства ПАО «НИПТИЭМ»;
- тяговому приводу 12-ти метрового автобуса с гибридной энергоустановкой производства ПАО «НИНТИЭМ», установленной на шасси автобусов 4-х предприятий стран СНГ;
- приводам стартера ГТА с двигателями производства ПАО «НИПТИЭМ» и ОАО «ЭЛДИН» с номинальными частотами 50 и 400 Гц, максимальной мощностью 160 кВт и системой управления производства ПАО «НИПТИЭМ».

На рис. 1 изображены временные диаграммы скорости, электромагнитного момента, тока в режиме разгона и торможения с максимальной скорости по предельным механическим характеристикам, полученные для тягового привода трактора 300 л.с. при следующих условиях: приведенный к валу двигателя момент инерции $J=8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; максимальное напряжение статора $U_{\max}=220\text{В}$. а) для системы 2; б) для системы 3.

На рис. 2 представлены аналогичные диаграммы в аналогичных режимах, применительно к системе 2 (а) и системе 5 (б) тягового привода мотор-колеса карьерного самосвала, грузоподъемностью 90 тонн при $J=40$ и $100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, соответственно.

На рис. 3 представлены временные диаграммы скорости, момента, тока в режиме ступенчатого реверса задания электромагнитного момента с максимального двигательного на максимальный генераторный и обратно, выполненного для тягового электропривода мотор-колеса карьерного самосвала 90 тонн с номинальной загрузкой, на скорости близкой к максимальной (60 км/час). а) для системы 2; б) для системы 5.

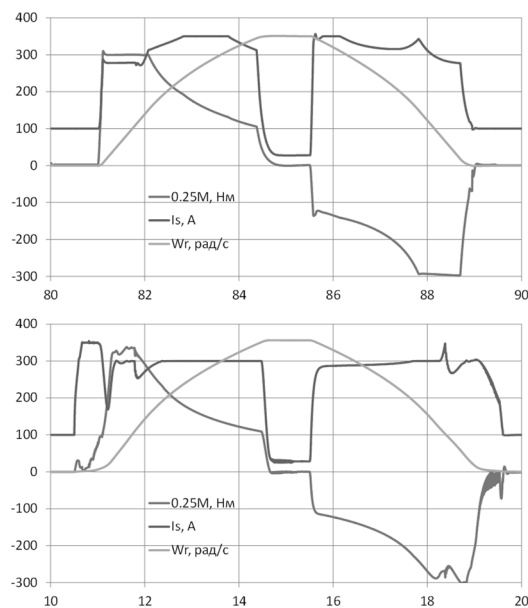


Рис. 1. Временные диаграммы разгона и торможения по предельной механической характеристике тягового привода трактора 300 л.с. для системы управления 2 (а) и 3 (б)

Для сопоставимости условий проведения экспериментов с различными системами управлений и корректности их последующего сравнения все эти условия, включая уровни напряжения звена постоянного тока, приняты одинаковыми, а сами системы настроены на свои предельно достижимые динамические и статические характеристики при принятых структурах регулятора и ограничениях на токи и напряжения преобразователя.

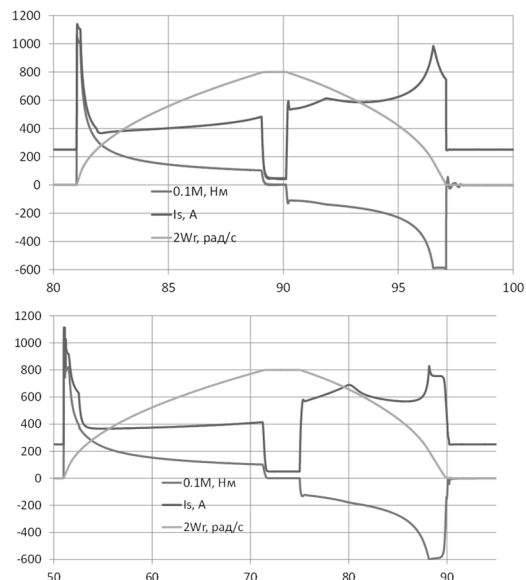


Рис. 2. Временные диаграммы разгона и торможения по предельной механической характеристике тягового привода мотор-колеса карьерного самосвала грузоподъемностью 90 тонн для системы управления 2 (а) при $J=40 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и 5 (б) при $J=100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

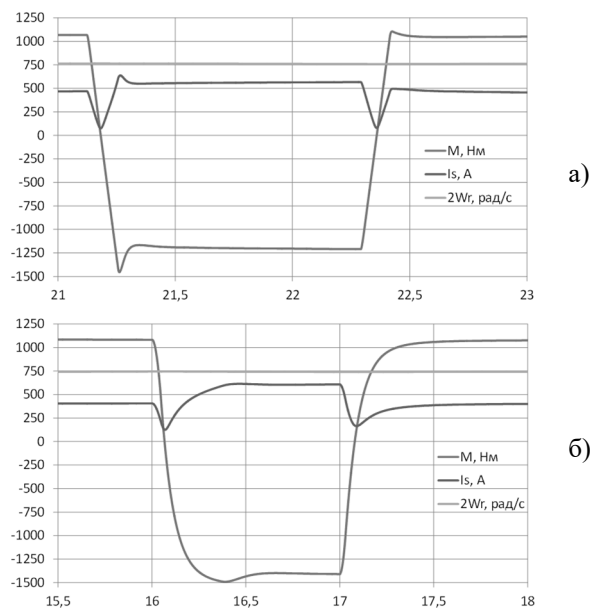


Рис. 3. Реверс предельной мощности тягового привода на максимальной скорости самосвала 90 тонн с номинальной загрузкой для системы 2 (а) и системы 5 (б)

С целью большей наглядности суммарные моменты инерции испытуемых приводов при модельных экспериментах, представленных на рис. 1 и 2, приняты несколько меньшими, а на рис. 3 несколько большим, чем реальные моменты инерции объекта управления. В частности, для самосвала 90 тонн с полной загрузкой приведенный к валу тягового двигателя момент инерции составляет $J=205 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. При реальных моментах инерции изменяется ускорение, а предельные значения переменных остаются неизменными.

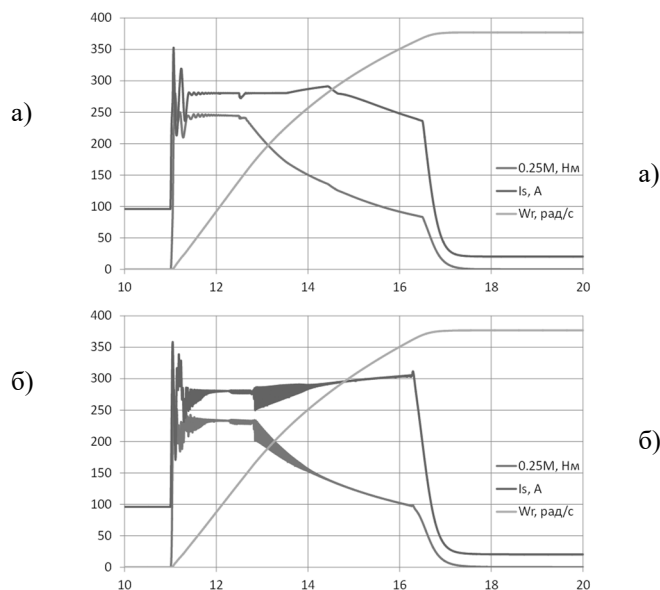


Рис. 4. Разгон на максимальную скорость по предельным механическим характеристикам стартера ГТА с максимальной мощностью 160 кВт, а) для системы 3; б) для системы 4

На рис. 4 изображены временные диаграммы скорости, момента, тока в режиме разгона на максимальную скорость по предельным механическим характеристикам, полученные для привода стартера ГТА максимальной мощностью 160 кВт. а) для системы 3; б) для системы 4. Привод питается от сети 380В, 50Гц. Суммарный момент инерции, принятый при эксперименте, составляет $10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Анализ представленных процессов, полученных для разных объектов управления с различными структурами систем управления АД без датчика скорости/положения, показал корректность сделанных выше замечаний о характерных особенностях и возможных областях применения приводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы технические требования к тяговым электроприводам без датчика скорости/положения транспортных средств с электромеханической трансмиссией и приводам стартеров газотурбинных агрегатов, в том числе распространяющиеся на высоконасыщенный асинхронный электропривод с большим температурным диапазоном, областью ослабления поля и высоким относительным уровнем потерь в стали.

Исследования, проведенные для асинхронных приводов без датчика скорости/положения, предназначенных для управления различными транспортными средствами с электромеханической трансмиссией и стартерами газотурбинных агрегатов показали, что рассмотренные варианты построения систем управления удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к этим электроприводам.

Наилучшим по критерию удовлетворения совокупности технических требований из рассмотренных вариантов построения системы управления для тягового электропривода следует признать комбинированную систему, при которой начальный этап разгона привода осуществляется в рамках системы векторного управления, а вся остальная работа выполняется в рамках системы частотного управления. При этом, обе конфигурации регулятора системы работают на основе одного и того же наблюдателя состояния. Наилучшим для стартера следует признать частотную систему с тем же наблюдателем, структура которого аналогична наблюдателю состояния электропривода исполнения 4 серии ЭПВ.

На основании выполненных исследований уместно сделать предположение, что в ближайшие несколько лет значительная часть тяговых электроприводов концерна «Русэлпром» будет переведено на бездатчиковые системы управления, что повысит их надежность и конкурентоспособность на рынке. Причем этот переход будет происходить постепен-

но с переходным периодом, когда датчики на электрические машины по-прежнему будут устанавливаться, но управляющие приводом контроллеры будут одновременно поддерживать как датчиковую, так и бездатчиковую версию системы управления электроприводом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 320 с.
2. А.Б. Виноградов, И.Ю. Колодин Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления // Электричество. – 2007. – №2. – С. 44–50.
3. А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов Особенности управления электроприводами транспортных средств с электромеханической трансмиссией // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Серия: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика (специальный выпуск) №36 (1009) 2013.- С.278-279.
4. А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев Комплекты тягового электрооборудования для карьерных самосвалов большой грузоподъемности // Добывающая промышленность. – 2017. – Выпуск № 2 (06). – С. 90-93.
5. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, Н.А. Глебов // Электротехника. – 2010. – №12. – С. 12–19.
6. А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, И.Ю. Колодин Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая Электроника. – 2006. – №3. – С. 46–51.
7. А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, С.В. Журавлев Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая Электроника. – 2007. – №1. – С. 78–84.
8. H. Kubota, K. Matsuse, T. Nacmo “DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor”, IEEE transactions on industry applications, VOL.29, №2, march/april 1993.
9. J. Holts, “Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives”, University of Wuppertal – Germany, Published in “Sensorless Control of AC Motors”. IEEE Press Book, 1996.
10. J. Holts, “Sensorless Speed and Position Control of Induction Motor Drives”, IEEE Electrical Machines and Drives Group, University of Wuppertal – Germany, IECON Roanoke VA, 2003.
11. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учеб. пособие / В.В. Панкратов, Д.А. Котин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012.- 143 с.